

アクチュエータに必要な二方向性の機能を
形状記憶ポリマーのみで実現する為の設計のポイント

今井 郷充

日本大学 理工学部 精密機械工学科 教授 博士(工学)

(株)技術情報協会

自己修復材料、自己組織化、形状記憶材料の開発と応用事例

2020.03.31出版

第6章 第5節 p397~407
ISBN978-4-86104-781-1

第5節 アクチュエータに必要な二方向性の機能を形状記憶ポリマーのみで実現する為の設計のポイント

日本大学 今井 郷充

はじめに

形状記憶効果とは、成形後にその形状を変形させても、ある温度以上に温度を上げることによって変形前の形状に戻る作用のことである。この作用をもつ形状記憶材料には、合金、高分子（ポリマー）、セラミクスなどがあり、この中では合金が多く用いられている。形状記憶ポリマー（Shape Memory Polymer, SMP）は形状記憶合金に比べて、軽い、加工しやすい、複雑な形状にも加工できる、形状回復ひずみが大きい等の長所がある。特にひずみは、形状記憶合金が通常5～7%程度であるのに対し、ポリマーは約400～500%程度と大きい。短所は形状回復力が小さいことである（形状記憶合金の約1%）¹⁾。機械の小型化/微小化により必要とされる発生力も小さくなるので、超小型の機器やMEMS分野では形状記憶ポリマーはアクチュエータとしての利用価値があると思われる。本節では微小な機械やMEMSを対象として形状記憶ポリマーのみを用いたアクチュエータの設計のポイントについて述べる。

1. 形状記憶ポリマーの概要

1.1 形状記憶のメカニズム

最初に形状記憶ポリマーにおける形状記憶効果のメカニズムについて概説する。形状記憶ポリマーは図1に示すように固定相と可逆相の2つの部分からなる。固定相は形状記憶ポリマーによって異なるが、たとえば分子の架橋部や高分子鎖が密集した結晶部などである。これは樹脂の流動性を防ぐ働きをする。形状記憶ポリマーでは、材料の温度が融点(T_m)まで下がり固化した際にその形状が記憶形状となる。可逆相は温度によって軟化/硬化が可逆的に起こり、この境界温度がガラス転移点温度(T_g)である。可逆相は T_g 以上では軟化（ゴム領域）、 T_g 以下では硬化する（ガラス領域）。もし温度が T_g 以上であれば可逆相は軟化しているので、固定相が持っている形状、即ち記憶形状が現れる。また T_g 以上の温度で外力を加えると形状記憶ポリマーは軟化しているので容易に変形するが、この状態で温度を T_g 以下にすると可逆相が硬化しその変形が保持される。再び温度を T_g 以上に上げれば記憶形状が現れる。相変態する合金の形状記憶とはメカニズムが異なる²⁾。以降で形状記憶ポリマーのみを用いたスマートアクチュエータを説明するが、2種類の形状記憶ポリマー層をもちいて1層目の形状記憶層で発生した記憶形状を2層目の形状記憶ポリマー層で発生した記憶形状でキャンセルさせる方法（重ね合わせの原理）を採っており、形状記憶動作を各層で行わせている。

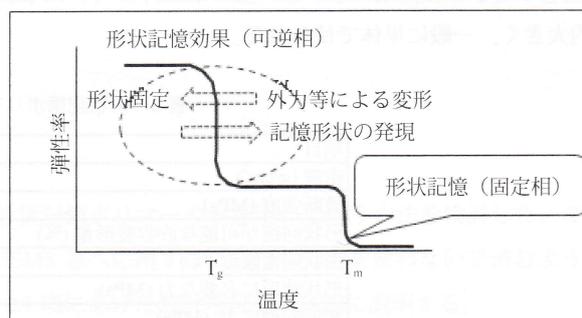


図1 形状記憶ポリマーにおける形状記憶メカニズム

1.2 形状記憶ポリマーの種類と応用例

主な形状記憶ポリマーの種類とガラス転移点温度 (T_g) を表1にまとめた。これらのうち使用実績が多いのはポリノルボルネン系である。ポリウレタン系は開発された時期は比較的新しいが、加工の自由度が高く（液体、固体型などがある）、 T_g をある範囲で変えられるという長所をもつ³⁾。応用例を表2にまとめた¹⁾。感温スイッチ、パイプ・電線などの接合部のシール材および継ぎ手、機械またはロボットなどの把持部材、流体の開閉バルブなどに使われている⁴⁻⁷⁾。本研究では T_g を変えられるという理由からポリウレタン系の形状記憶ポリマーを使用した。ポリウレタン系を用いたアクチュエータにおいて他の研究もある^{6,7)}。アクチュエータにおいては記憶形状発生後の形状の復元が必要となるが、

これらの研究では流体や空気圧を利用している。

表1 主な形状記憶ポリマー

形状記憶ポリマー	メーカー（商品名）	T _g (°C)
ポリノルボルネン	日本ゼオン (ノーソレックス)	約 35
トランスポリイソブレン	クラレ (クラレ TPI)	約 67
スチレン-ブタジエン共重合体	旭化成 (アスマー)	約 40
ポリウレタン	三菱重工 (ディアプレックス, ダイアリイ)	-40 ~ 120 (可変)

表2 形状記憶ポリマーの主な応用例

分類	具体的な応用例
各種工業部品	パイプ・電線等の接合用継手またはシール材, パイプのラミネート材, 流体閉閉バルブ, 機器の把持部品, カップリング
感温スイッチ, センサー	感温性の電気/光スイッチ, 温度センサー, PTC 抵抗体
医療機器	ギプス, カテーテル, 内視鏡部品, 歯列矯正ワイヤ
日用品など	高齢者・身障者用食器, 装飾品, スポーツ用品, 玩具等

2. 形状記憶ポリマーのアクチュエータへの応用

2.1 設計のための検討項目

形状記憶ポリマーにおける技術分野としては、材料の設計および改良技術、機能を実現するための構造等の設計、製品化のための加工・製造技術等があり、その内容は特許などから把握できる。ここではアクチュエータに関する設計方法について述べる。アクチュエータにおける使い方としては、単体として使う場合と構造材と組合わせて使う場合があるが、微小な機械や MEMS では構造材と組合わせて使う方法（複合化）が一般的である。これは形状記憶材料としての強度や剛性が関係しているためである（薄膜などとして使用されるため）。形状記憶ポリマーの一般的な材料定数を表3に示すが¹⁾、形状記憶合金に比べ形状記憶ポリマーは強度・剛性等の値が低い。一方形状記憶合金はこれらの値が比較的大きく、一般に単体で使われる。

表3 形状記憶ポリマーの一般的な物性

項目	形状記憶ポリマー	形状記憶合金
密度 (g/cm ³)	0.96-1.1	6 ~ 8
破断強度 (MPa)	10 ~ 35	700 ~ 1100
形状回復が可能な許容変形量 (%)	250 ~ 800	6 ~ 7
形状回復温度 (°C)	25 ~ 90	-10 ~ 100
形状変形に必要な力 (MPa)	1 ~ 3	50 ~ 200
変形回復応力 (MPa)	1 ~ 3	150 ~ 300

(注) 参考文献1) による

形状記憶ポリマーをアクチュエータに応用する場合の設計項目は以下のように考えられる。

- ① 2方向動作をさせるための方法。
- ② ガラス転移点温度 (T_g) を適切に決めることおよび T_g のばらつきへの対処。
- ③ 温度変化により材料または構造自体の熱変形が生じないようにすることおよび局所的な熱変形が生じないような均一な加熱方法。
- ④ 必要な変位が得られるように形状記憶ポリマーの形状・サイズを決めること。
- ⑤ 変形の再現性や応答速度が低いことへの対処。

①はアクチュエータとして使用する場合に重要である。形状記憶効果は1方向性なので、アクチュエータにおいては

2方向性化する必要がある。よく見られる例は、外力を与えて変形させたのち、形状記憶効果で記憶形状に戻す、あるいは逆に記憶形状を発生させたのち、外力を加えて元の形状に戻すといったやり方である⁴⁷⁾。後者においては、パイアスばねのほか、流体などがよく用いられている。たとえば、形状記憶効果で曲がられた円管に対して、内部に液体を流すことで元の形状(直状)に戻す⁶⁾、マッキベン型のアクチュエータで、内部に気体を送り込んで膨らませて袋状にしたものを形状記憶効果でもとの形状に戻す⁷⁾などである。これらの例において作用させる外力は、流体を流すあるいは空気を送り込むといった単純な操作で発生するようになっており、流体が比較的多く用いられているのは操作が単純で小型化にも適するためと思われる。形状記憶材料(合金)自体に2方向性を持たせる研究も行われている^{8,9)}。また形状記憶ポリマーと形状記憶合金の併用で2方向性化を図るものもある。形状記憶合金では、加熱時に形状記憶効果で収縮、放熱時に復元といった2方向動作をするワイヤーが市販されている。

②においては、使用温度に応じた適切な T_g をもつ形状記憶ポリマーを選択すべきである。そうでないと加熱に要する時間が長くなる、環境温度による影響を受ける等の問題が生ずる。また動作温度 T_g にばらつきがあるので調べておく必要がある。

③は構造材との組合せで使用する際に、温度変化によって熱変形が生ずることへの対策を意味する。これには熱的対称構造にするなどの方法が考えられる。熱的対称構造にしないと記憶形状のほかに熱変形が加わり、意図した形状が得られない。また温度変化を与えるための加熱においても、均一な温度上昇となるよう加熱方法を考える必要がある。本研究のアクチュエータの構造を以降に示すが(図6)、熱的対称構造となるように留意した。

④に関しては、構造材とともに用いる場合はその剛性も考慮して発生力の設計をしておく必要がある。バルク材料ならば構造材(または基板)は不要であるが、薄膜の場合は必要である。この場合、構造材の剛性によって形状記憶ポリマーの発生変位が減少するが、薄膜の場合は発生力が小さいので特にこの点は重要である(大きめの記憶形状を与える必要がある)。 T_g 付近の弾性率を用いた弾性学の大変形解析¹⁰⁾や有限要素法解析により必要な発生力を予測し、それをもとに形状記憶ポリマーの形状・サイズを決めるなどの方法が考えられる。形状記憶ポリマーの一般的な発生力は表3に示されているが、種類や形状に依存する。なお基板を用いる場合は、基板の弾性を利用して復元力を発生させ、発生した記憶形状をキャンセルできる。この場合は形状記憶ポリマー単層でも繰り返し動作を行わせることができる(2.2.4参照)。

⑤においては、変位の再現性や応答速度は一般的に高くないので、これらが問題にならないか検討しておく必要がある。

2.2 形状記憶ポリマーのみによる2方向動作

2.2.1 2方向動作のメカニズム

2方向動作させる方法について2.1について述べたが、形状記憶ポリマーのみを用いて行う方法を検討した。これは形状記憶ポリマーによるアクチュエータを超小型機器やMEMS等へ応用するにあたり外力を使わないで済むようにすることを目的とした基礎的な検討である。これを例として2.1項にあげた設計項目を具体的に説明する。

この方法では、形状記憶ポリマーの形状記憶効果のみによって変形・復元両方を行う。変形または復元のために外力を併用する方法がよく用いられるが、サイズが小さくなると実現しにくい。この方法の原理は、 T_g の異なる2種類の形状記憶材料を使い、一方に変形させたい形状、もう一方にはこれを打ち消すための逆形状を記憶させることである。加熱により温度を上げてゆくと、まず低い温度 T_{g1} で発生させたい形状が現れ、さらに高い温度 T_{g2} になった時に逆形状が生じ、重ね合わせにより温度 T_{g1} で発生した形状が打ち消される(形状の復元)。異なる T_g をもつ形状記憶ポリマーが必要になるが、そのため T_g のある温度範囲で自由に換えられるポリウレタン系形状記憶ポリマーを用いた。

この方法を片持梁型のアクチュエータが曲げ変形を発生する場合を例として図2に示す。まず片持梁の基板の各表面に形状記憶ポリマー層を形成する。一方の形状記憶ポリマー層に記憶させたい形状、もう一方の形状記憶ポリマー層にその逆形状を与える。各層の記憶形状が生ずる温度(T_g)を異なるようにするため、その温度を T_{g1} 、 $T_{g2}(T_{g1} < T_{g2})$ とする。図に示すように、加熱して温度が T_{g1} になると発生させたい形状が現れ、さらに加熱して温度が T_{g2} になるともう一方の記憶形状が発生する。即ち T_{g2} 以上の温度では2つの記憶形状が同時に発生した状態となり、重ね合わせの原理によ

り変形前の状態に戻る。こののち温度をガラス領域 (T_{g1} 以下) まで下げるとこの形状で固定化され、再び加熱すると上記の動作が繰り返される。比較のため、同様な動作を外力による方法で行う場合を図3に示す。加熱により温度が T_g に達すると記憶形状が現れる。温度が T_g 以上で外力を作用させて変形前の状態に戻る。その後冷却し、形状固定する。これらの方法を比較すると、図2の方法では外力を作用させることが不要であるので構造を単純化でき、操作も加熱と放熱のみで簡単である。

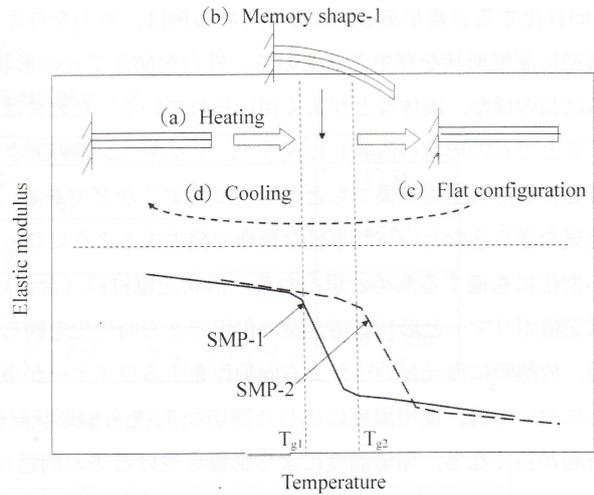


図2 形状記憶ポリマーにより二方向動作させる方法

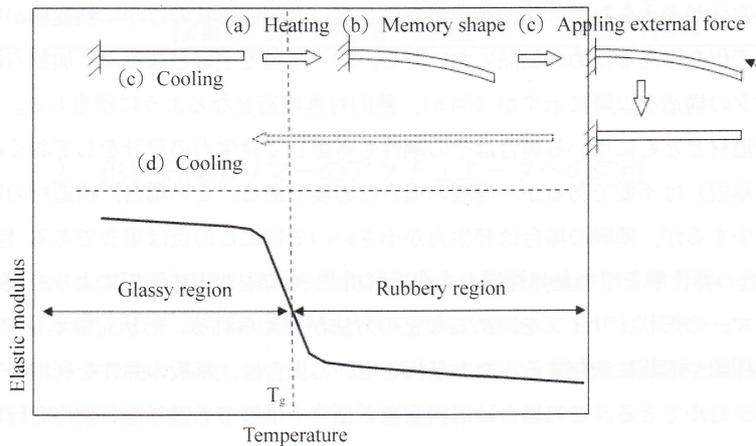


図3 形状記憶効果と外力により二方向動作をさせる方法
(この場合は、変形：形状記憶効果，復元：外力)

2.2.2 ポリウレタン系形状記憶ポリマーの温度特性

使用したポリウレタン系材料(表1)について説明する³⁾。主原料はポリオールとジイソシアネートで、さらに鎖延長剤を配合したものである。主原料の配合、分子構造、分子量を変化させることにより T_g を -40°C から 120°C の範囲で自由に設定することができる。またペレット、ビーズ、液体など様々な形態があるが、薄膜とするため液体タイプを使用し、スピンコーティングにより成膜した。 T_{g1} と T_{g2} の設定については、アクチュエータの使用環境温度より少し高い温度に T_{g1} を設定し、2つの形状記憶効果が同時に起こらないようにするために必要な温度差を考慮して T_{g2} を決めた。室温でアクチュエータを使用するものとして、 $T_{g1} = 35^{\circ}\text{C}$ 、また T_{g2} はガラス転移点温度のばらつきを考慮して 55°C とした。使用した形状記憶ポリマー (MS3520 および MS5520) の材料特性を表4に示す。膜厚はスピンコーティングの回転数および時間を変えて変化させた ($20 \sim 80 \mu\text{m}$ 、回転数: $2000 \sim 4000 \text{ rpm}$ 、回転時間: $20 \sim 90\text{s}$)。

図4に膜厚と形状記憶動作による発生変位の関係を示す。アクチュエータはポリエチレンテレフタレートシート (PET) を基板とした片持り型 (PET: 長さ $28 \text{ mm} \times$ 幅 $5 \text{ mm} \times$ 厚さ $115 \mu\text{m}$) とし、異なる膜厚の形状記憶ポリマー層を片面に塗布し、曲率半径約 17 mm の曲げによるたわみを記憶形状として与えた。形状記憶効果による発生変位は図4においてかなり小さくなっているが、これは2.1項④で述べたように基板 (PETシート) の剛性のためと考えられる。また形状記憶ポリマーの膜厚によっても発生変位は異なっている (記憶形状は全て前記の曲率とした)。膜厚が大きい方が発生変位は大きくなる傾向があるが、 $40 \mu\text{m}$ 以上では飽和する傾向が見える。

ポリウレタン系形状記憶ポリマーの温度特性は明らかにされているが^{11,12)}、形状記憶ポリマーの T_g のばらつきを調べるため、温度と弾性率の関係を測定した。2種類の形状記憶ポリマーの T_g の差は小さい方が加熱に要する時間を短

くするうえで望ましいが、同時に記憶形状が発生することは避けなければならない。サンプルとした形状記憶ポリマーは円形のダイアフラムとし（直径7 mm, 厚さ51 μm ）、弾性率は測定した固有振動数から算出した（周囲固定円板の固有振動数¹³⁾、密度は表4の値を使用し、ポアソン比は0.4とした）。測定結果を図5に示す。形状記憶ポリマーの T_g は $\pm 5^\circ\text{C}$ 程度のばらつきがあり、これより T_{g1}, T_{g2} を 35°C および 55°C とした。

表4 ポリウレタン形状記憶ポリマー（液体タイプ）*の材料特性

項目		MS3520	MS5520
密度 (kg/m^3), 固形分 (%)		1250, 30	
粘度 (cPs, 25°C)		80,000 ~ 120,000	
ガラス領域	引張強さ (MPa)	70	65
	伸び (%)	40-60	
ゴム領域	引張強さ (MPa)	14	11
	伸び (%)	>400	
T_g ($^\circ\text{C}$)		35	55

* (株)SMPテクノロジーズ, 参考文献3) による

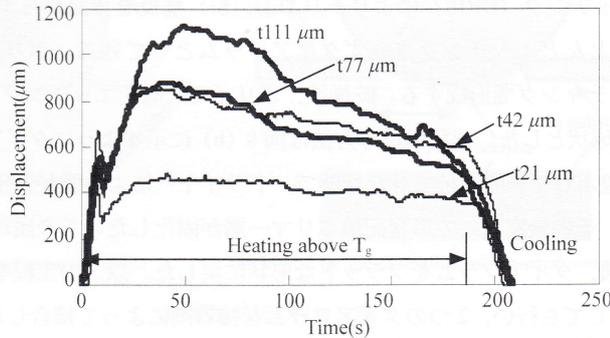


図4 形状記憶ポリマーの膜厚と記憶形状による発生変位
(形状記憶ポリマー: MS5520(表4), 片持はり(PETシート(L28 mm × W5 mm × t115 μm))の片面に形状記憶ポリマーを塗布した場合の先端変位. 記憶形状: 曲率半径17 mmの湾曲形状)

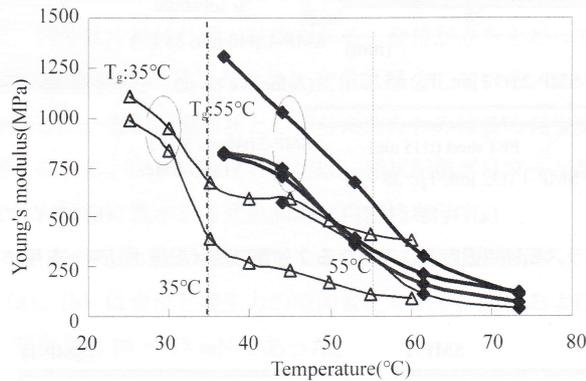


図5 ポリウレタン系形状記憶ポリマーの温度と弾性率
($T_g=35^\circ\text{C}$ (MS3520), 55°C (MS5520), ϕ 7 mm × t51 μm のダイアフラムにおいて測定(図6(b)参照)

2.2.3 アクチュエータの構造

前記2方向性のメカニズムを片持はり型とダイアフラム型のアクチュエータに適用した。片持はり型の構造を図6(a)に示す。ガラス転移点温度が形状記憶ポリマーの T_{g2} よりも高く、弾性率が比較的小さいポリエチレンテレフタレートシート(PET, $T_g=70 \sim 80^\circ\text{C}$)を基板とした。基板の一方の面に形状記憶ポリマー1を塗布し、記憶形状を与えて固化させたのち、 T_{g1} 以上の温度でこれをフラットな状態に戻し、基板の反対側に同様に形状記憶ポリマー2を塗布し記憶形状の付与を行った。記憶形状は塗布膜が流動しない程度の曲げ曲率とした。なお粘度調整によってある程度流動性を変えることは可能である。

ダイアフラム型の構造を図6(b)に示す。2種類の形状記憶ポリマーによって各ダイアフラムをつくり、記憶形状を付与した。記憶形状は半球状とした。2つのダイアフラムを接着により一体化した(記憶形状が逆向きになる状態に接合)。接合には低剛性の接着剤を使用した。上記いずれの構造においても形状記憶ポリマーは対象な配置にして熱的対称性を確保し、加熱による熱変形が生じないようにした。

図7は片持はり型(図6(a))の加工方法を示す¹⁴⁾。形状記憶ポリマー1(SMP1)を基板にスピンコートし、記憶させたい形状に保持する(液体タイプなので T_g 以上で可)。形状は曲げによる湾曲形状とした。図7(d)に示すように保持し、この状態で自然乾燥させた(曲率半径約17mm)。この際に記憶形状は付与される。次にガラス転移点(T_{g1})以上の温度にして軟化させ、この状態で平坦な形状に戻し室温で放置した。平坦な形状になったのち基板の反対側の面に形状記憶ポリマー2(SMP2)の層を形成した。以降のプロセスはSMP1と同じであるが、平坦な状態に戻す際の温度はガラス転移点温度(T_{g2})以上である。

図8(a)はダイアフラム型(図6(b))の加工方法を示す。形状記憶ポリマーを塗布するためのダイアフラムのベース材料はポリイミド薄膜とした(Hitchi Chemical DuPont, PIX-3400, $t_{10} \mu\text{m}$)。ポリイミド薄膜の作製では、前駆体であるポリアミドをスピンコートしベーキングによりポリイミド化した¹⁵⁾。シリコン(Si)基板の片面にポリイミド薄膜を形成したのち、ドライエッチング(DRIE)によりシリコン(Si)基板を背面からエッチングして開口部を設けた。このときポリイミド膜はほとんどエッチングされずダイアフラムとして残る。ポリイミド薄膜上に形状記憶ポリマー層(SMP1)をスピンコーティングで形成する。乾燥後、ポリイミド層をエッチング液によって除去した(TORAY Eng. TPE3000)。記憶形状は半球状とした。形状の付与方法は図8(b)に示すようにダイアフラム開口部($\phi 7 \text{ mm}$)に金属球($\phi 15 \text{ mm}$)を置き形状記憶ポリマー膜を撓ませた状態で、ドライヤーにより膜が軟化する温度(約 130°C で融点よりやや低い温度)まで加熱し、その後室温にて形状記憶ポリマー層が固化したのち金属球を取り除いた。次に温度をガラス転移点温度以上まで加熱後、ダイアフラムをフラットな形状に戻した。以上の工程を異なるガラス転移点温度の形状記憶ポリマー(SMP2)に対しても行い、2つのダイアフラムを接着剤によって接合した。

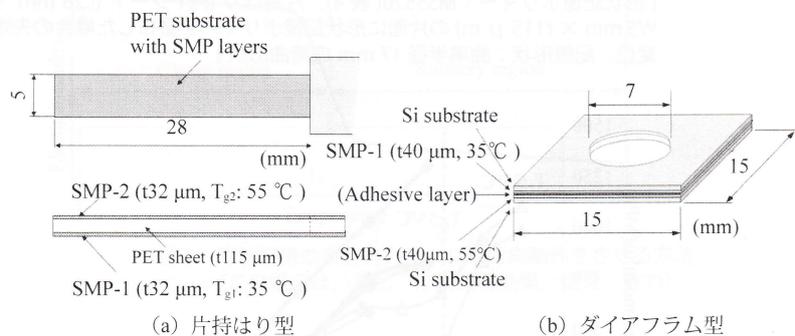


図6 ガラス転移点温度(T_g)の異なる2種類の形状記憶ポリマーを用いたアクチュエータ

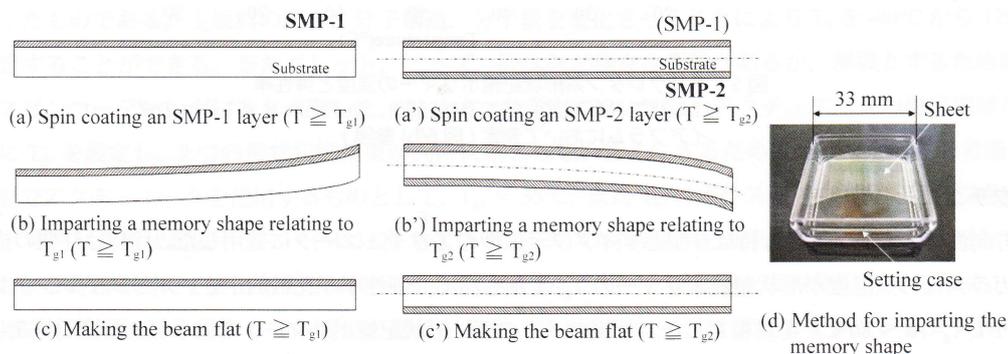


図7 片持はり型アクチュエータの加工方法

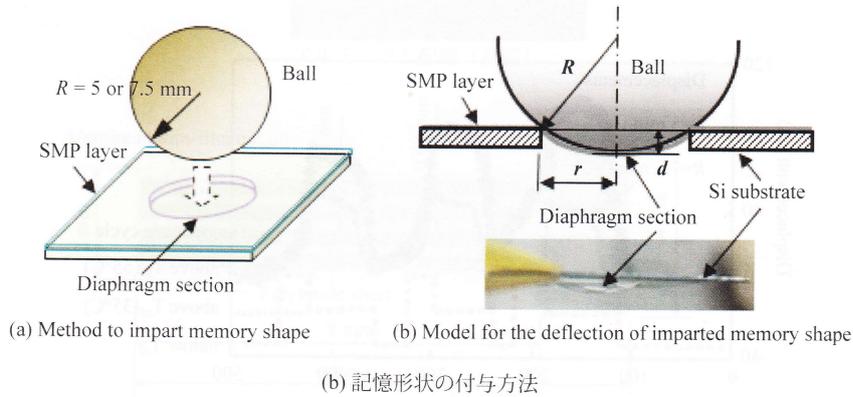
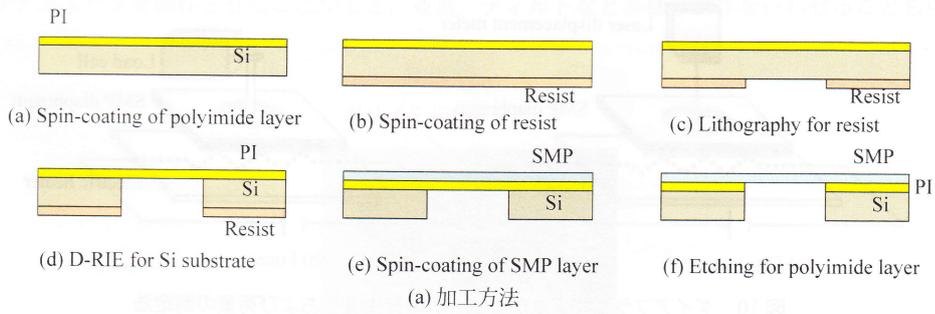


図8 ダイアフラム型アクチュエータの加工方法

2.2.4 アクチュエータの特性

前記2種類のアクチュエータの変位の測定結果を示す。測定において加熱は上下等距離にシート状のヒーターを設置し、上下対象に加熱するようにした。図9は片持ちり型の結果である。変位が立ち上がっている部分は加熱により温度が T_{g1} に達した状態、さらに加熱して温度が T_{g2} に達したときに変位は減少している。この状態で T_{g1} 以下の温度まで自然放熱させ、このサイクルを繰り返した。なお記憶形状として与えたたわみはこの発生変位よりも十分大きく、基板の剛性等のために小さくなったと考えられる。図9における変位は、形状記憶ポリマーと基板を含めた組合梁としての曲げ剛性の比でほぼ小さくなっていた。図中に数本ある変位曲線は再現性を示す。

図10はダイアフラム型アクチュエータの変位 (a) および発生力 (b) の測定法を示す。変位はレーザー変位計、発生力はロードセルで測定した。図11 (a), (b) は変位と発生力の時間変化を示す。変位および発生力はガラス転移点温度を境に立上りおよび立下りが生じ、発生力は10~15 mNであった。

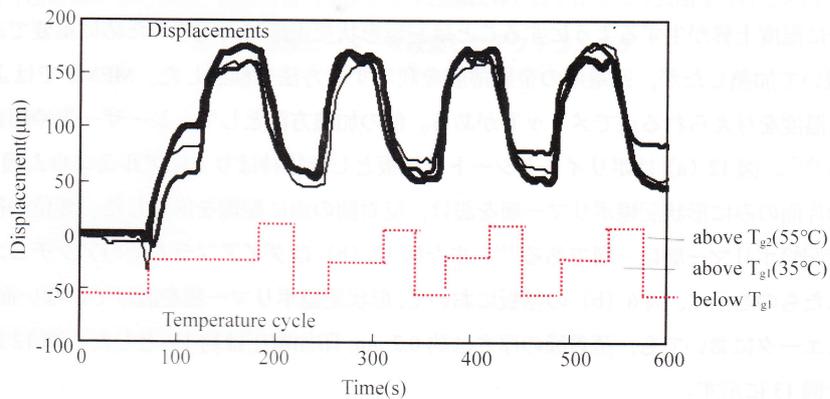


図9 片持ちり型アクチュエータの発生変位 (図6 (a), はり先端, 外部ヒーターの加熱による)

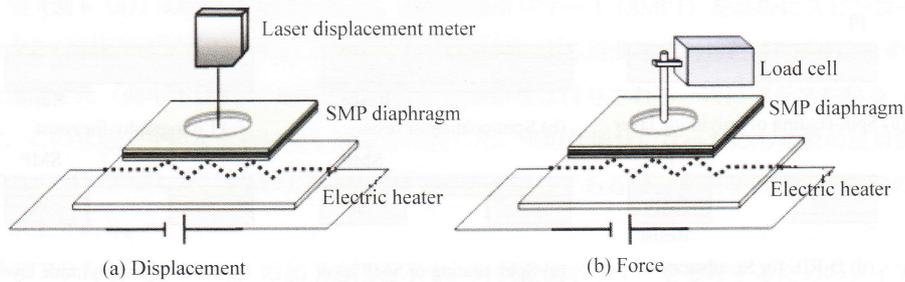


図 10 ダイアフラム型アクチュエータの発生変位および荷重の測定法

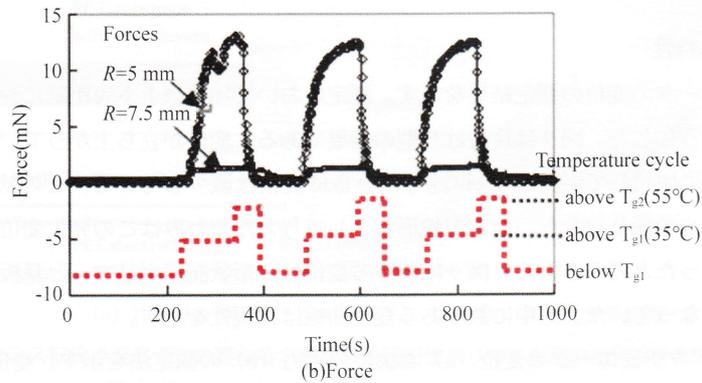
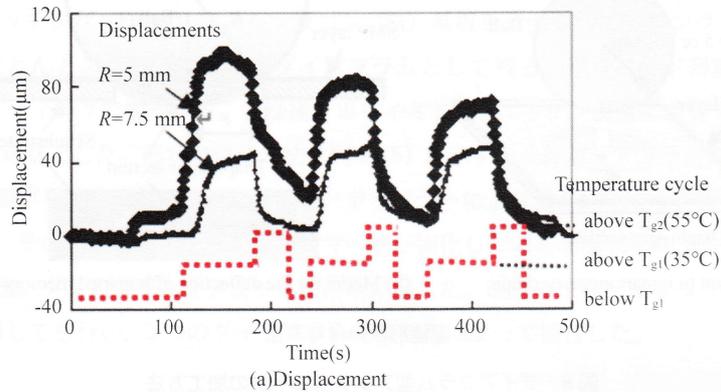


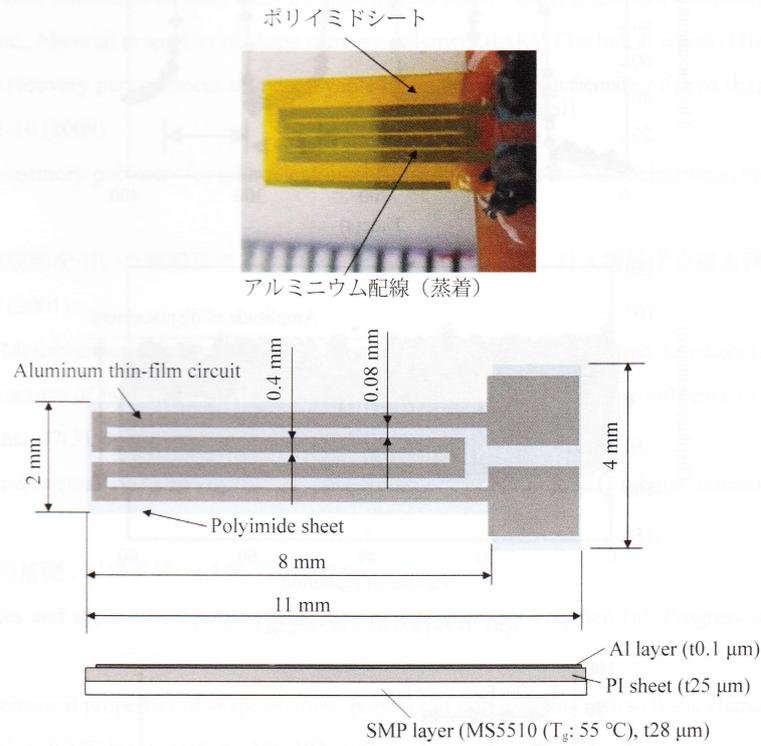
図 11 ダイアフラム型アクチュエータの発生変位および荷重
(図 6 (b), ダイアフラム中心, 外部ヒーターの加熱による)

加熱の際に均一に温度上昇が生ずるようにすることは記憶形状を正確に再現するために重要である。図 9, 11 では上下にヒーターを置いて加熱したが, 通電用の金属薄膜を利用する方法も検討した。MEMS ではよく用いられる方法であり, ほぼ均一な温度を与えられる点でメリットがある。他の加熱方法として, レーザー光や超音波などを用いる方法も提案されている^{16,17)}。図 12 (a) はポリイミドシートを基板とした片持はり上にアルミニウム膜 (配線) を形成したものである。基板の片面のみに形状記憶ポリマー層を設け, 反対側の面に配線を形成した。変位の復元は基板の弾性を用いているため形状記憶ポリマー層は一層である¹⁴⁾。また図 12 (b) はダイアフラム型のアクチュエータにおいてアルミニウム膜を蒸着したものを示す。図 6 (b) の基板において, 形状記憶ポリマー層を設けていない面に蒸着膜を形成した。いずれのアクチュエータにおいても, 蒸着膜の厚さは約 $0.2 \mu\text{m}$, 印加電圧は約 1V とした。図 12 に示した薄膜ヒーターによる発生変位を図 13 に示す。

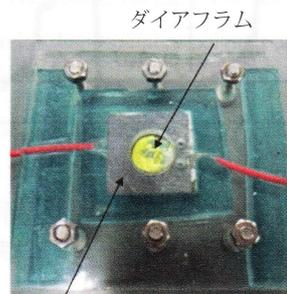
図 13 (a) 上は片持はり型における時間と変位 (はり先端) の関係である。加熱部が近くにあるため変位の立上りが比較的速い。図 13 (a) 下は片持はり型において, 繰り返し数を増やして変位の再現性を調べた結果である。図 13 (b) はダイアフラム型の時間と変位 (ダイアフラム中心) の関係を示す。

MEMS 加工を用いて, 図 14 に示すようにアクチュエータのアレー化が可能である。個々にヒーターを設けることに

より個々にアクチュエータを動作させることができ、並進、ティルトなど多様な動作を行わせることも可能となる。



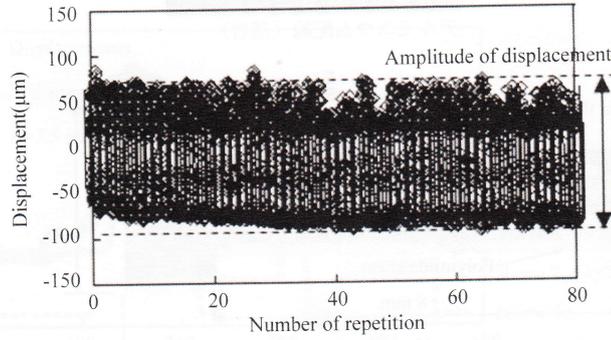
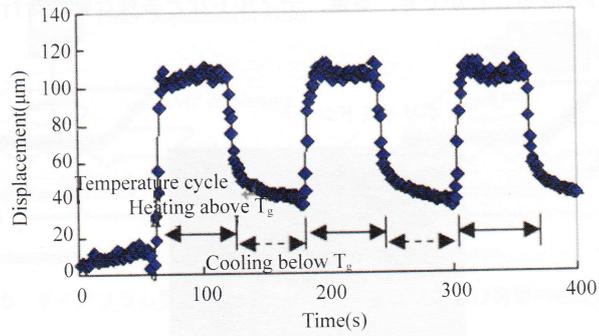
(a) 片持り型 (形状記憶ポリマー層は片面)



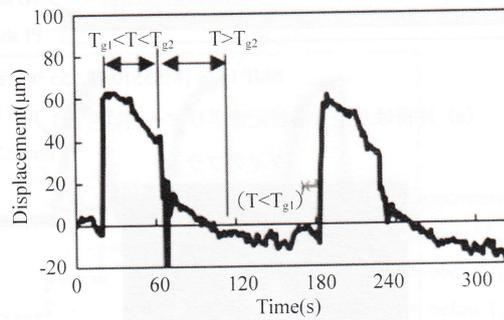
(b) ダイアフラム型

(寸法は図 6 (b) 参照, 基板背面 (ダイアフラム部以外) にアルミニウム膜を付けたもの)

図 12 薄膜ヒーターを設置したアクチュエータ



(a) 片持り型 (はり先端)



(b) ダイアフラム型 (ダイアフラム中心)

図 13 薄膜ヒーターによるアクチュエータの発生変位 (図 12 の場合)

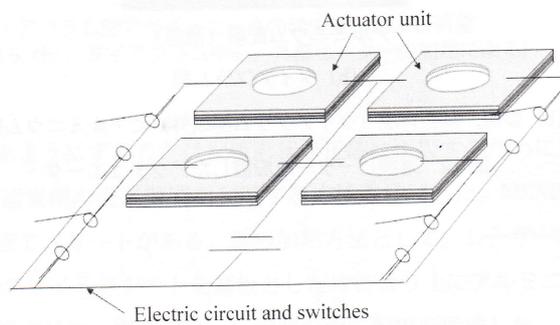


図 14 薄膜ヒーターを設置したアレーアクチュエータの概念図

おわりに

形状記憶ポリマーを MEMS などの微小なアクチュエータに応用する際に必要と考えられる設計項目を述べた。形状記憶ポリマーは材料自体の剛性や形状回復力が小さいが、微小な機械や MEMS 等のアクチュエータには適していると思われる。このような分野への応用に関して参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 入江正浩ほか, 形状記憶ポリマーの材料開発, シーエムシー出版, p.10-11, p.29 (2000)
- 2) S. Miyazaki et al., "Thin film shape memory alloys, Fundamentals and device applications, Cambridge Univ. Press (2009)
- 3) SMP technologies Inc., Material properties of shape memory polymer DIARY, (Technical report) (2009)
- 4) X. Lan et al., Shape recovery performances of a deployable hinge fabricated by fiber-reinforced shape-memory polymer, Proc. of SPIE, 7289, pp. 1-10 (2009)
- 5) K. Gall *et al.*, Shape-memory polymers for microelectromechanical systems, J. of Microelectromechanical Systems, 13, (3), pp. 472-83 (2004)
- 6) 神谷ほか, 形状記憶樹脂を用いた膨膜形マイクロマニピュレータの試作, 日本機械学会機素潤滑設計部門講演論文集, 1, 217, pp.127-128 (2001)
- 7) K. Takashima et al., McKibben artificial muscle using shape memory polymer, Sensors and Actuators (A), 164, pp.116-24 (2010)
- 8) K. Okita et al., Appearance of two-way strain in shape memory effect of Ti-Ni-Nb alloy-influence of applied strain on two-way strain, Materials Trans., 47(3), pp.753-758 (2006)
- 9) Y. Yoo et al., An experimental study of the two-way shape memory effect in a NiTi tubular actuator, Smart Mater Struct, 19, pp.1-8 (2010)
- 10) 加藤, 応用弾性学の基礎. コロナ社, p.126-130 (1974)
- 11) S. Hayashi, Properties and applications polyurethane-series shape memory Polymer, Int. Progress of Urethanes, 6, pp.90-115 (1993)
- 12) H. Tobushi et al., Mechanical properties of shape memory polymer of polyurethane series (Basic characteristics of stress-strain-temperature relationship), JSME Int. J., I/35, pp.296-302 (1992)
- 13) JSME. JSME Mechanical Engineers' Concise Handbook. 7th Ed. p.102 (2011)
- 14) S. Imai, Operating methods for two-way behavior shape memory polymer actuators without using external stress, IEEJ Trans. 9, pp.90-96 (2014)
- 15) S. Imai, et al, Thin-Film polyimide membrane actuators fabricated by etching a substrate by DRIE (Bosch Process)Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME, 6, 2, pp.287-295 (2012)
- 16) G. Bear et al., Shape memory behavior of thermally stimulated polyurethane for medical applications, Applied Polymers Science, 103, pp.3882-3892 (2007)
- 17) 神谷ほか, 形状記憶樹脂製膨膜形マイクロマニピュレータのための超音波加熱に関する基礎実験, 日本機械学会機素潤滑設計部門講演論文集, 4, 219, pp.183-184 (2004)